

Resultados del modelo meteorológico WRF-ARW sobre Cataluña, utilizando diferentes parametrizaciones de la convección y la microfísica de nubes

J. Mercader¹, B. Codina¹, A. Sairouni² y J. Cunillera²

¹Departamento de Astronomía y Meteorología, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès 1, 08028 Barcelona

²Servei Meteorològic de Catalunya, Berlín 38, 08029 Barcelona

Recibido: 14-IV-2010 – Aceptado: 10-VIII-2010 – Versión Traducida

Correspondencia a: jmercader@am.ub.es

Resumen

El modelo meteorológico WRF-ARW (Weather Research and Forecasting - Advanced Research WRF) es un modelo de nueva generación que cuenta con una creciente comunidad de usuarios alrededor del mundo. En el marco de un proyecto para estudiar la viabilidad de implementarlo operativamente en el Servei Meteorològic de Catalunya, se ha realizado una verificación de los pronósticos producidos por el modelo en varios casos de precipitación observada sobre Cataluña. Precisamente, dada la importancia de los pronósticos de la precipitación en esta zona, uno de los principales objetivos ha sido el estudio de la sensibilidad del modelo en distintas configuraciones de sus parametrizaciones de la convección y la microfísica de nubes. En este trabajo, se muestran los resultados de esta verificación sobre dos dominios, uno de 36 km de paso de malla y otro, anidado unidireccionalmente al anterior, de 12 km. En el dominio externo, la evaluación se ha basado en el análisis de los principales parámetros estadísticos (ME y RMSE) para la temperatura, humedad relativa, geopotencial y viento, y se ha determinado que la combinación que utiliza el esquema convectivo de Kain-Fritsch con el esquema microfísico WSM5 ha proporcionado los mejores resultados. A continuación, con esta configuración fijada por el dominio externo, se han realizado pronósticos en el dominio anidado combinando también distintos esquemas de convección y microfísica de nubes, y se ha llegado a la conclusión que la configuración que acierta más es la que combina la parametrización convectiva de Kain-Fritsch con el esquema de microfísica de Thompson.

Palabras clave: WRF, convección, Cataluña, microfísica, mesoescala

1 Introducción

Durante los últimos años, se han utilizado varios modelos meteorológicos de área limitada para las tareas operativas de predicción meteorológica en Cataluña. El Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), por ejemplo, ha estado trabajando con los modelos MASS, MM5 y Lokal Modell (Sairouni et al., 2007).

Recientemente, y bajo el liderazgo del *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), de los Estados Unidos, se ha desarrollado un nuevo modelo meteorológico de área limitada, el *Weather Research and Forecasting Model* (WRF). Se trata de un modelo de nueva generación, una de cuyas características es su doble vertiente de modelo de

investigación y de pronóstico. Según Klemp (2006), uno de los objetivos del WRF es acelerar la transferencia de los avances en investigación a la meteorología operativa. Todas estas características, junto con el hecho de tratarse de un modelo de libre distribución, han atraído a un gran número de usuarios.

Por estos motivos, se creyó conveniente estudiar el comportamiento del WRF en Cataluña, sobre todo pensando en su futura utilización operativa. En este contexto, hay que tener en cuenta el significado práctico que tiene el campo de precipitación para una gran variedad de usuarios de los pronósticos, desde los mismos meteorólogos hasta el público en general (Davis et al., 2006). Precisamente, en el caso de Cataluña, una proporción substancial de la

Tabla 1. Lista de todos los casos de estudio, con el número de instantes de inicialización y el número total de simulaciones realizadas para cada caso. El número de simulaciones responde a las 6 configuraciones probadas para cada instante de inicialización, resultantes de la combinación de dos esquemas de microfísica de nubes con 3 opciones para la parametrización de la convección.

Casos de estudio (AAAA/MM/DD)	Número de instantes de inicialización	Número de simulaciones
2006/06/15-16	4	24
2006/07/05-06	4	24
2006/08/23-25	6	36
2006/09/12-16	9	54
2006/09/24	2	12
2006/10/11-12	3	18
2006/10/17-20	7	42
2007/02/08	2	12
2007/02/17	2	12
2007/03/07	2	12
2007/03/16	2	12
TOTAL	43	258

precipitación registrada proviene de nubes convectivas, llegando a representar el 70-80% del total de precipitación caída en verano (Llasat y Puigcerver, 1997) y en el ámbito geográfico del Mediterráneo Occidental, la mayoría de episodios de precipitaciones extremas y de inundaciones son causadas por episodios convectivos (Llasat, 2001).

Dada la importancia que tienen los fenómenos convectivos en Cataluña, y el consiguiente interés en obtener el mejor acierto posible en los pronósticos de precipitaciones, el estudio se ha centrado en evaluar la sensibilidad del modelo en distintas combinaciones de las parametrizaciones de la convección y de la microfísica de nubes, con el objetivo de encontrar, de entre todas ellas, la configuración con más acierto en el pronóstico de varias variables. Concretamente, se han estudiado las simulaciones del modelo para un conjunto de once casos de estudio, combinando los tres esquemas convectivos disponibles en la versión 2.2 del WRF con dos esquemas de microfísica: el conocido como WSM5 (Hong et al., 2004) y el de Thompson et al. (2004).

En este sentido, se ha optado por limitar el número de posibles combinaciones de esquemas físicos disponibles en el modelo para evaluar varios casos de estudio, y de este modo, aumentar la representatividad de los resultados respecto a los que se obtendrían si se consideraran unos pocos. En consecuencia, no se han llevado a cabo estudios de sensibilidad en otras parametrizaciones físicas que también habrían sido de gran interés para el diseño de la configuración operativa del WRF en Cataluña, sobre todo los esquemas de capa límite (PBL) y de procesos superficiales. Precisamente, Wisse y Vilà-Guerau de Arellano (2004) demostraron que los esquemas de PBL tenían un gran impacto en los campos de lluvia simulados por el modelo MM5 en el estudio de un caso de precipitación convectiva severa también en Cataluña.

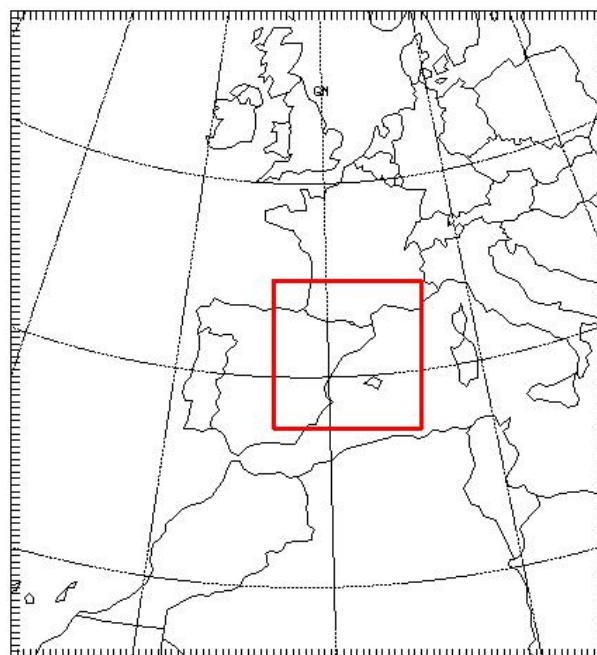


Figura 1. Dominio de 36 km de paso de malla con el dominio anidado de 12 km indicado con el cuadro interior.

Recientemente, y sobre todo en el ámbito geográfico de los Estados Unidos, se han llevado a cabo estudios similares, en los que se ha evaluado la sensibilidad del campo de precipitación pronosticado por el WRF en distintas configuraciones de las parametrizaciones físicas, entre las que se encuentran las de la convección y la microfísica de nubes (Koo y Hong, 2008; Jankov et al., 2007; Gallus y Bresch, 2006); no obstante, también proliferan los trabajos con dominios de alta resolución, como los de Kain et al. (2005), Kain et al. (2006), Otkin et al. (2006), o bien Weisman et al. (2008), en los que se opta por un tratamiento explícito de la convección, de modo que el esquema convectivo queda al margen de los estudios de sensibilidad. En cuanto al ámbito geográfico de Cataluña, no se conoce ningún trabajo que evalúe la sensibilidad de los pronósticos en la configuración del modelo WRF para las variables que se analizan en el presente trabajo. De todas formas, cabe destacar dos publicaciones recientes que verifican los pronósticos del WRF para varias variables superficiales (como temperatura y humedad a 2 metros o viento a 10 metros), en una de las cuales se comparan los resultados de los pronósticos producidos por los dos núcleos dinámicos del modelo (ARW y NMM) sobre Europa (Jorba et al., 2008) mientras que en el otro se analiza la sensibilidad en un conjunto de 23 configuraciones del modelo WRF sobre la Península Ibérica (Borge et al., 2008).

En la siguiente sección, se detallan los casos de estudio seleccionados y, seguidamente, se hace una descripción de la configuración del modelo utilizada para la ejecución de las simulaciones. En la sección 4 se explica la metodología

Tabla 2. Principales características de los dominios y los datos iniciales y de contorno.

	Dominio externo	Dominio anidado
Paso de malla horizontal	36 km	12 km
Dimensiones (X, Y, Z)	94, 102, 31	70, 70, 31
Paso de tiempo	216 s	72 s
Condiciones iniciales	GFS $1^\circ \times 1^\circ$, pronóstico + 12 horas + asimilación (vía 3DVAR) de METAR y radiosondeos	
Condiciones de contorno (CC)	GFS $1^\circ \times 1^\circ$ Pronósticos inicializados 12 horas antes	Pronósticos WRF dominio externo
Frecuencia de CC	6 horas	216 segundos

Tabla 3. Parametrizaciones físicas (fijas y variables) utilizadas en las simulaciones.

Parametrizaciones variables	Parametrizaciones fijas
Convección:	Superficie:
- Kain-Fritsch (KF)	- NOAH LSM (4 capas de subsuelo)
- Betts-Miller-Janjic (BMJ)	PBL:
- Grell-Devenyi (GD)	- YSU
Microfísica:	Capa superficial:
- WRF Single Moment 5-class (WSM5)	- Monin-Obukhov (MM5)
- Thompson	Radiación:
	- Dudhia (onda corta) y
	- RRTM (onda larga)

de la verificación y en la sección 5 se exponen y se evalúan los resultados. El último apartado está dedicado a las conclusiones y a las futuras líneas de trabajo.

2 Casos de estudio seleccionados

Para la evaluación del modelo se seleccionaron 11 casos de estudio (Tabla 1) comprendidos entre el 15 de junio de 2006 y el 16 de marzo de 2007, durante los cuales se observaron lluvias sobre Cataluña, algunas de ellas de carácter claramente convectivo.

De estos episodios destacamos dos de gran importancia: el del 25 de agosto de 2006, en el que una tormenta aislada provocó una riada que arrastró numerosos coches a la riera de Calella, en el Maresme, y el episodio comprendido entre el 12 y el 16 de septiembre de 2006, durante el cual muchos observatorios registraron acumulaciones diarias superiores a los 100 mm (Mercader et al., 2007). El mismo episodio de septiembre también ha sido estudiado a fondo por Mateo et al. (2009).

3 Diseño de las simulaciones

3.1 Configuración de los dominios

Las simulaciones se han ejecutado sobre 2 dominios (Figura 1) idénticos a los utilizados en el SMC para los pronósticos operativos del modelo MM5 (Sairouni et al., 2007) de cara a facilitar, en un futuro, la comparación entre el funcionamiento del WRF y el MM5. Las características de

los dos dominios: el externo, de 36 km de paso de malla, y el interno, anidado en el anterior, de 12 km, se especifican en la Tabla 2. Para ambas rejillas se utiliza el conjunto de 31 niveles verticales definido por defecto por el modelo WRF-ARW (Wang et al., 2007).

3.2 Datos iniciales y de contorno

Tal y como se especifica también en la Tabla 2, las condiciones iniciales y de contorno del dominio externo se obtienen de los pronósticos del modelo global GFS ($1^\circ \times 1^\circ$ de resolución horizontal) inicializados 12 horas antes de la hora de inicio de la simulación. El campo inicial, que corresponde a un pronóstico a 12 horas del GFS, se mejora mediante la asimilación de datos observacionales (METAR y radiosondeos) con el método 3DVAR (Barker et al., 2004). Las condiciones de contorno del dominio anidado son interpoladas desde el dominio exterior con un período igual al paso de tiempo de integración del dominio externo.

3.3 Configuración de las parametrizaciones físicas

Dado que el objetivo del trabajo es el de evaluar el comportamiento de los pronósticos del WRF en función de la parametrización de la convección y la microfísica de nubes, para cada instante de inicialización se han efectuado varias simulaciones manteniendo fijas las parametrizaciones de la radiación, capa superficial, subsuelo y capa fronteriza, y variando los esquemas convectivos y de la microfísica de nubes.

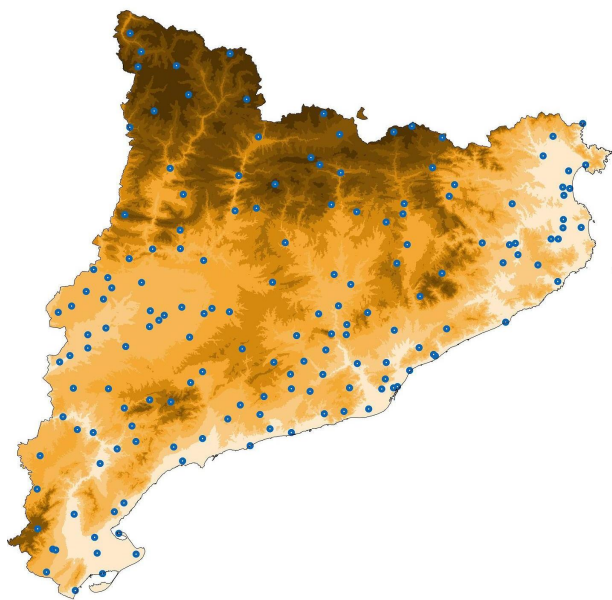


Figura 2. Pluviómetros de la red de estaciones meteorológicas automáticas del SMC.

La Tabla 3 sintetiza todas las opciones de la física utilizadas en las simulaciones, tanto las variables como las físicas. Estas últimas se han escogido, por un lado, respetando las que tienen una versión análoga o precedente en el modelo MM5 que sea utilizada en la configuración operativa del SMC, y por otro lado, teniendo en cuenta los resultados de otros investigadores que han trabajado con el WRF.

En el caso concreto de la capa fronteriza (PBL), disponemos de 3 esquemas en la versión 2.2 del modelo: en primer lugar, la parametrización del *Medium Range Forecast model* (MRF) descrita en Hong y Pan (1996), e implementada también en el modelo MM5, pero se prevé su desactivación en el WRF (Wang et al., 2007); en segundo lugar, el esquema de PBL de la *Yonsei University* (YSU), desarrollado por Hong et al. (2006) como una revisión de la parametrización MRF, y, finalmente, el esquema de Mellor-Yamada-Janjic (MYJ). Para este estudio se ha fijado el esquema YSU porque se trata de la nueva generación del esquema MRF, utilizado por el modelo MM5 en la operativa del SMC. Para los procesos de superficie, cada opción de parametrización va ligada a un esquema de PBL (Skamarock et al., 2005), de manera que a YSU le corresponde la parametrización basada en la teoría de semejanza de Monin-Obukhov desarrollada originalmente para el modelo MM5.

La combinación de todos los esquemas variables da 6 posibles configuraciones que pueden definirse tal como se llaman en la Tabla 4.

Finalmente, es importante destacar que el trabajo de verificación constó de dos etapas bien definidas: en primer lugar se llevaron a cabo las pruebas para determinar la configuración

óptima para el dominio externo, y, una vez encontrada, se efectuaron las pruebas para el dominio interno, de manera que las condiciones de contorno proporcionadas desde el dominio exterior provienen de la configuración seleccionada.

4 Metodología de la verificación

4.1 Dominio externo ($\Delta x = 36$ km)

En el dominio de 36 km se ha verificado el pronóstico de la temperatura, la humedad relativa, la altura geopotencial y la velocidad del viento mediante el cálculo del error medio (ME), que sirve para determinar si el modelo, en conjunto, presenta algún sesgo en el pronóstico de estas variables, y de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), que se puede interpretar como la magnitud típica del error (Wilks, 1995), ya que mantiene las unidades de la variable evaluada. Para el viento también se ha determinado el promedio del módulo del vector error del viento (MVWE), que se define según:

$$MVWE(i, j) = \frac{1}{N_i N_j} \sum_i \sum_j VWE(i, j) \quad (1)$$

donde:

$$VWE(i, j) = \sqrt{[u_F(i, j) - u_A(i, j)]^2 + [v_F(i, j) - v_A(i, j)]^2} \quad (2)$$

donde N_i y N_j son las dimensiones X e Y de la malla, respectivamente, $u(i, j)$ y $v(i, j)$ son los componentes del viento en el punto de malla (i, j) y los subíndices F y A hacen referencia, respectivamente, a los campos pronosticado y analizado. Para calcular todos estos índices se han seguido dos métodos: la verificación malla a malla y la verificación punto a punto.

Concretamente, el primer método ha consistido en comparar, para cada variable, los valores pronosticados con los valores analizados. Estos últimos se han obtenido a partir de la interpolación en el dominio externo de los campos procedentes del análisis del modelo GFS (FNL-GFS), mejorados con la ingestión de datos observacionales con el WRF-3DVAR. Como resultado de esta comparación se han calculado, por un lado, los valores de los índices estadísticos en cada uno de los puntos de la malla, y, por otro lado, los valores medios de estos índices sobre todo el dominio externo.

En la verificación punto a punto, en cambio, los valores previstos de cada variable en los niveles verticales estándar se han verificado respecto a las observaciones proporcionadas por los radiosondeos procedentes de todas las estaciones comprendidas dentro del dominio.

Mientras que la verificación malla a malla permite disponer tanto de unos valores globales de los distintos índices estadísticos sobre todo el dominio como de una distribución espacial del error, la verificación punto a punto tiene la ventaja de posibilitar la comparación directa de la salida del modelo con las observaciones.

Tabla 4. Conjunto de las 6 configuraciones posibles resultantes de la combinación de los esquemas variables: convección y microfísica de nubes.

Microfísica	Convección		
	Kain-Fritsch (KF)	Betts-Miller-Janjic (BMJ)	Grell-Devenyi (GD)
WRF Single Moment 5-class (WSM5)	KF-WSM5	BMJ-WSM5	GD-WSM5
Thompson (Thom)	KF-Thom	BMJ-Thom	GD-Thom

Tabla 5. ME (RMSE) de la temperatura, humedad relativa, presión a nivel del mar y altura geopotencial, y MVWE para el viento de los pronósticos a 24 horas inicializados a las 00 Z, correspondientes a la verificación malla a malla sobre el dominio de 36 km de paso de malla. Los mejores resultados se indican en negrita.

	NIV (hPa)	KF-WSM5	KF-Thom	BMJ-WSM5	BMJ-Thom	GD-WSM5	GD-Thom
T (°C)	850	-0.18 (1.27)	-0.24 (1.30)	-0.32 (1.31)	-0.28 (1.31)	-0.30 (1.33)	-0.28 (1.34)
	700	-0.09 (0.97)	-0.08 (0.97)	-0.20 (0.99)	-0.17 (0.98)	-0.12 (0.98)	-0.09 (0.98)
	500	-0.03 (0.92)	-0.03 (0.91)	+0.02 (0.93)	+0.01 (0.92)	-0.01 (0.93)	-0.01 (0.92)
	300	+0.21 (0.96)	+0.31 (0.99)	+0.27 (0.97)	+0.37 (1.01)	+0.24 (0.97)	+0.35 (1.00)
HR (%)	850	+0.1 (13.5)	+1.2 (13.6)	-0.1 (13.1)	-0.2 (13.2)	+0.2 (14.5)	+0.4 (14.5)
	700	-1.1 (16.6)	-0.7 (16.5)	-0.3 (16.4)	-0.2 (16.5)	-1.5 (17.1)	-1.4 (17.2)
	500	-0.4 (19.9)	+0.4 (20.0)	+1.6 (20.6)	+2.3 (20.8)	-1.2 (20.1)	-0.7 (20.2)
	300	-8.3 (23.7)	-6.2 (22.6)	-8.2 (23.7)	-6.1 (22.5)	-8.2 (23.6)	-6.0 (22.5)
P (hPa)	Niv. mar	-0.3 (1.5)	-0.4 (1.5)	-0.3 (1.5)	-0.4 (1.5)	-0.2 (1.5)	-0.3 (1.5)
Z (m)	850	-4.4 (11.7)	-4.5 (11.7)	-3.8 (11.6)	-3.8 (11.2)	-4.4 (11.8)	-4.6 (11.9)
	700	-5.3 (12.1)	-5.5 (12.3)	-5.9 (12.6)	-5.5 (12.1)	-5.6 (12.5)	-5.7 (12.5)
	500	-5.6 (14.3)	-5.7 (14.4)	-6.3 (14.6)	-5.9 (13.9)	-5.9 (14.5)	-6.0 (14.5)
	300	-4.2 (17.8)	-3.4 (17.7)	-3.8 (17.8)	-2.5 (16.9)	-4.1 (17.9)	-3.3 (17.8)
Viento (m s ⁻¹)	850	4.01	4.02	4.09	4.09	4.04	4.04
	700	3.82	3.84	3.87	3.87	3.86	3.87
	500	4.11	4.11	4.13	4.12	4.11	4.10
	300	5.61	5.62	5.60	5.61	5.58	5.59

4.2 Dominio interno ($\Delta x = 12$ km)

En el caso del dominio interno, el acierto de los pronósticos de temperatura, humedad relativa y viento se ha evaluado sólo mediante la metodología punto a punto, y el cálculo del ME y RMSE (también MVWE por el viento) se ha efectuado respecto a los perfiles verticales observados de estas variables procedentes de 3 estaciones de radiosondeo: Barcelona, Palma y Zaragoza.

Finalmente, también se ha verificado el pronóstico cuantitativo de la precipitación, la variable que más interesa en este trabajo, utilizando varios índices estadísticos obtenidos a partir de la comparación del campo pronosticado con el campo observado. Para llevar a cabo esta verificación, ha sido necesario, en primer lugar, construir un análisis de la precipitación observada sobre una malla de 32×24 puntos sobre Cataluña, en la cual también se ha interpolado el campo pronosticado. A continuación, se ha aplicado una máscara a ambos campos para comparar, únicamente, el área correspondiente a Cataluña, ya que el campo analizado

se ha obtenido a partir de las observaciones pluviométricas procedentes de la *Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques* (Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas, XEMA, según las iniciales en catalán) del SMC (Figura 2).

Con los campos resultantes de aplicar la máscara, se han evaluado los pronósticos cuantitativos de precipitación desde dos perspectivas complementarias: por un lado, la aproximación clásica, basada en la comparación punto a punto de los campos pronosticado y observado y el cálculo de varios índices estadísticos a partir de tablas de contingencia, como por ejemplo la probabilidad de detección (POD), la proporción de falsa alarma (FAR), el sesgo (BIAS) o el *Critical Success Index* (CSI), todos ellos definidos, por ejemplo, en Ebert (2008); y por otro lado, la aproximación basada en la verificación parcial (más conocida como *fuzzy*) que recompensa la proximidad entre pronósticos y observaciones relajando el requerimiento de coincidencia exacta (Ebert, 2008). En otras palabras, la verificación parcial o *fuzzy* asume que un pronóstico puede ser igualmente útil si se encuentra ligeramente desplazado respecto a la observación y este des-

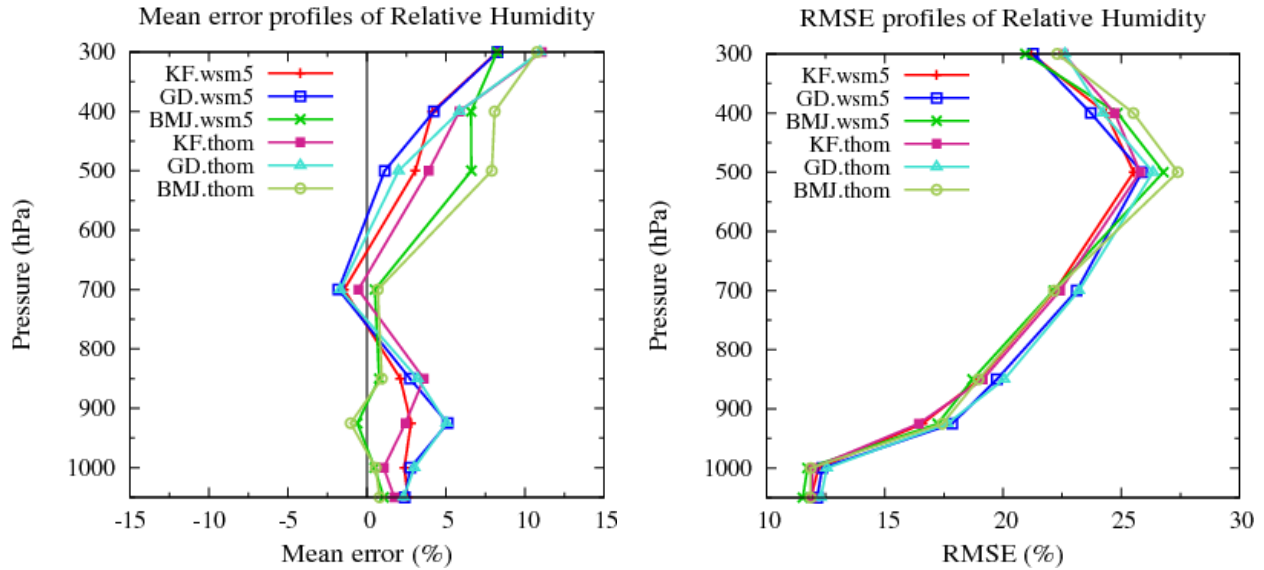


Figura 3. Perfiles verticales, para la verificación punto a punto de (a) (izquierda) ME y (b) (derecha) RMSE de la humedad relativa calculados sobre todas las estaciones de radiosondeo comprendidas dentro del dominio de 36 km.

plazamiento viene determinado por la medida de la vecindad o ventana de puntos de la malla alrededor del punto de interés.

Ebert (2008) recopila toda una serie de técnicas de verificación que se enmarcan en este último enfoque, y las clasifica en función de la estrategia de correspondencia (según si se considera vecindad sólo alrededor del pronóstico o también alrededor de la observación) y del modelo de decisión, que es el criterio que se fija para determinar si hay acuerdo entre pronóstico y observación. Concretamente, en este trabajo se ha optado por aplicar dos técnicas de verificación parcial que se enmarcan en el segundo grupo de las estrategias de acuerdo, de modo que se considera un área alrededor del punto de observación para dar cuenta de la incertidumbre asociada al campo observado; son las siguientes:

- **Mínima cobertura:** Asume que un pronóstico es útil si el acontecimiento es pronosticado en una cantidad mínima de puntos dentro de la ventana. En el presente trabajo, se toma el requerimiento más permisivo, ya que se considera acierto si, en al menos un punto dentro de la ventana, se pronostica y se observa el acontecimiento. Siguiendo este criterio, pueden construirse tablas de contingencia a partir de las correspondencias entre ventanas y calcular los índices de verificación utilizados en la aproximación clásica (POD, FAR, BIAS, CSI). Así pues, esta técnica, permite el uso de estos índices bajo el concepto de verificación parcial, y en el caso particular de ventanas construidas por una sola celda, se recuperan los valores de la aproximación clásica.
- **Fractions Skill Score (FSS):** Desarrollado por Roberts y Lean (2008), establece que un pronóstico es útil si la frecuencia de los acontecimientos pronosticados y la de

los observados son similares. El índice estadístico se calcula según:

$$FSS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i^2} \quad (3)$$

donde F_i y O_i son la fracción de acontecimientos pronosticados y observados, respectivamente, en cada una de las N ventanas i de un tamaño determinado. En este sentido, se considera que un acontecimiento tiene lugar si la precipitación supera un cierto umbral de intensidad.

El FSS tiene un rango entre 0 y 1 (nula y máxima habilidad, respectivamente), y para muestras lo suficientemente grandes, tiende a crecer a medida que se aumenta la escala de verificación, determinada por el tamaño de la ventana de vecindad. Roberts y Lean (2008), además, también proponen un valor umbral ($FSS_{uniform}$) para este índice a partir del cual puede considerarse que el modelo tiene un acierto aceptable, hecho que permite determinar, si se calcula FSS para distintas escalas, a partir de cuál el pronóstico es suficientemente hábil. $FSS_{uniform}$ viene determinado por el índice FSS que se obtendría con ventanas de una sola celda para un pronóstico en el que la fracción en cada una de las celdas fuera igual a la fracción de celdas del dominio donde se observa lluvia (f_o), de modo que:

$$FSS_{uniform} = 0.5 + \frac{f_o}{2} \quad (4)$$

donde:

$$f_o = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} O_i \quad (5)$$

y N_1 es el número total de celdas del dominio.

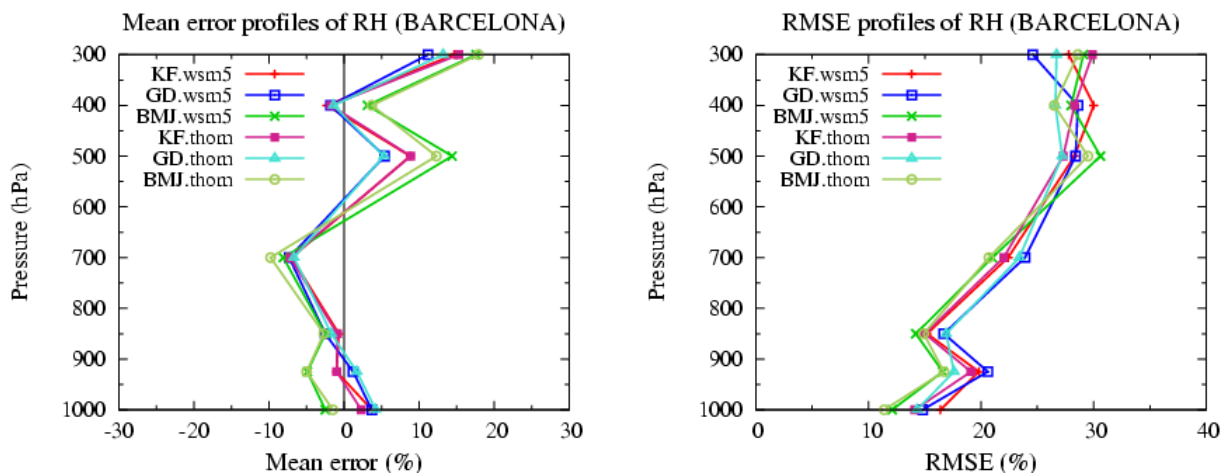


Figura 4. Perfiles verticales de (a) (izquierda) ME y (b) (derecha) RMSE para la humedad relativa (HR) en Barcelona, correspondientes a los pronósticos a 24 horas inicializados a las 00 Z.

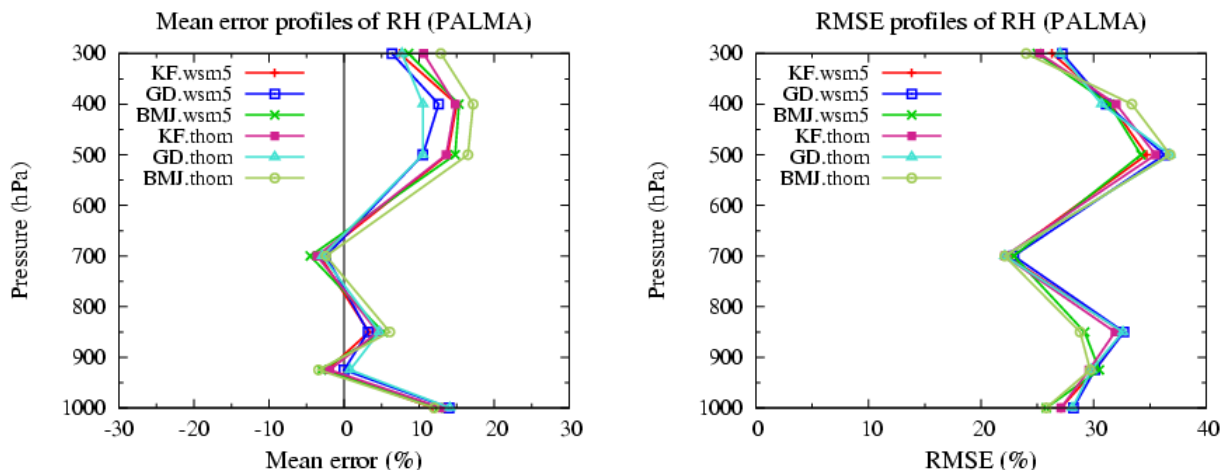


Figura 5. Como en la Figura 4, para Palma.

La verificación de la precipitación se ha efectuado para varios horizontes de pronóstico (hasta 48 horas) y umbrales de intensidad (entre 0.5 mm 6h⁻¹ y 50 mm 1h⁻¹).

5 Resultados

5.1 Dominio externo ($\Delta x = 36$ km)

En esta sección se sintetizan los resultados de la verificación de los pronósticos de temperatura, humedad relativa, altura geopotencial y viento, obtenidos a partir de los dos métodos de comparación descritos anteriormente: malla a malla y punto a punto. A modo de ejemplo, en la Tabla 5 se muestran los principales índices estadísticos para evaluar el pronóstico a 24 horas (inicializado a las 00 Z) de estas variables a distintos niveles verticales, obtenidos a partir de la verificación malla a malla.

Algunas de las características detectadas en el análisis de los resultados de la verificación a 36 km son comunes a todas las variables, como por ejemplo:

- Más sensibilidad a la parametrización de la convección en los niveles bajos; en los niveles altos resulta más difícil distinguir la configuración que proporciona resultados más satisfactorios.
- A 300 hPa, los pronósticos parecen más sensibles al esquema de microfísica de nubes que a la parametrización de la convección.

Más específicamente, el pronóstico de la temperatura se caracteriza por tener un RMSE que aumenta con el horizonte de pronóstico y, tal como puede verse en la Tabla 5, disminuye con la altura, aunque este último comportamiento presenta una excepción entre los niveles más elevados (500 y 300 hPa). También se aprecia un sesgo de signo negativo en los niveles más cercanos a la superficie y de signo positivo a 300 hPa. Teniendo en cuenta estos índices, los mejores resultados en el pronóstico de la temperatura se obtienen con las configuraciones que utilizan la parametrización de la convección Kain-Fritsch.

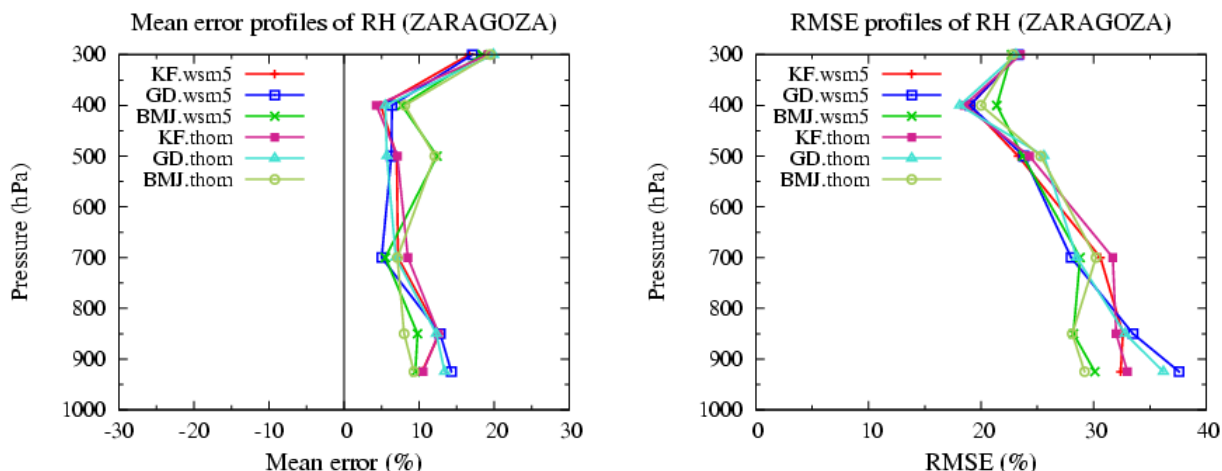


Figura 6. Como en la Figura 4, para Zaragoza.

Tabla 6. Valores de CSI, POD y FAR calculados para los umbrales de intensidad de 3 mm 6h⁻¹ (valores superiores) y 10 mm 6h⁻¹ (valores inferiores) correspondientes a las simulaciones de las 00 Z a un horizonte de pronóstico de 18 horas. Los valores más elevados de CSI y POD y los menores de FAR están destacados en negrita.

	KF.wsm5	KF-Thom	BMJ.wsm5	BMJ-Thom	GD.wsm5	GD-Thom
CSI	0.43	0.43	0.44	0.46	0.39	0.40
	0.10	0.10	0.05	0.04	0.10	0.10
POD	0.67	0.67	0.66	0.67	0.62	0.62
	0.23	0.25	0.07	0.06	0.25	0.26
FAR	0.46	0.46	0.43	0.41	0.49	0.47
	0.86	0.85	0.89	0.91	0.86	0.86

Por otro lado, tal como se aprecia en la Tabla 5, en cualquier configuración, la altura geopotencial es subestimada en todo el perfil vertical y también es subestimada la presión atmosférica reducida a nivel del mar. A partir de los índices RMSE y ME resulta difícil averiguar cuál es la mejor configuración, pero si el pronóstico de esta variable es evaluado con el índice S1 (Wilks, 1995), los mejores resultados (valores no mostrados) los proporciona la configuración KF-WSM5.

En cuanto al viento, se observa cómo ésta es una de las variables menos sensibles a la parametrización de la convección y, de hecho, el índice MVWE da resultados muy similares en todas las configuraciones (ver Tabla 5).

Los pronósticos de la humedad relativa se muestran como los más sensibles a los esquemas convectivos, característica que también han detectado, por ejemplo, Koo y Hong (2008) en su evaluación del WRF. Esta variable presenta un sesgo de valor más pequeño en los niveles bajos, donde todas las configuraciones tienden a ser más húmedas (ver Tabla 5 y Figura 3). También se aprecia cómo las configuraciones con el esquema convectivo de BMJ son las más secas en los niveles bajos y las más húmedas en niveles elevados. El RMSE, por su lado, aumenta con la altitud (ver Tabla 5 y Figura 3) pero las diferencias entre las configuraciones son

demasiado pequeñas como para decidir cuál de ellas tiene el mejor acierto.

Finalmente, con los resultados obtenidos, puede llegarse a la conclusión que las dos configuraciones con el esquema convectivo de Kain-Fritsch proporcionan los mejores pronósticos de temperatura, altura geopotencial y viento, y de entre las dos, la que utiliza la parametrización de la microfísica de WSM5 presenta una ligera ventaja respecto a la otra.

5.2 Dominio interno ($\Delta x = 12$ km)

En primer lugar, se muestran los resultados de la verificación de las variables convencionales respecto a los perfiles observados mediante radiosondeos y, a continuación, se analizan los índices estadísticos de verificación de los pronósticos cuantitativos de precipitación.

5.2.1 Variables convencionales

Generalmente, los valores de ME y RMSE para las temperaturas son bajos; la variable tiende a ser sobrestimada en los niveles altos, mientras que su comportamiento en los niveles bajos depende de la estación de radiosondeo con la que se compare. De todos modos, se observa que las confi-

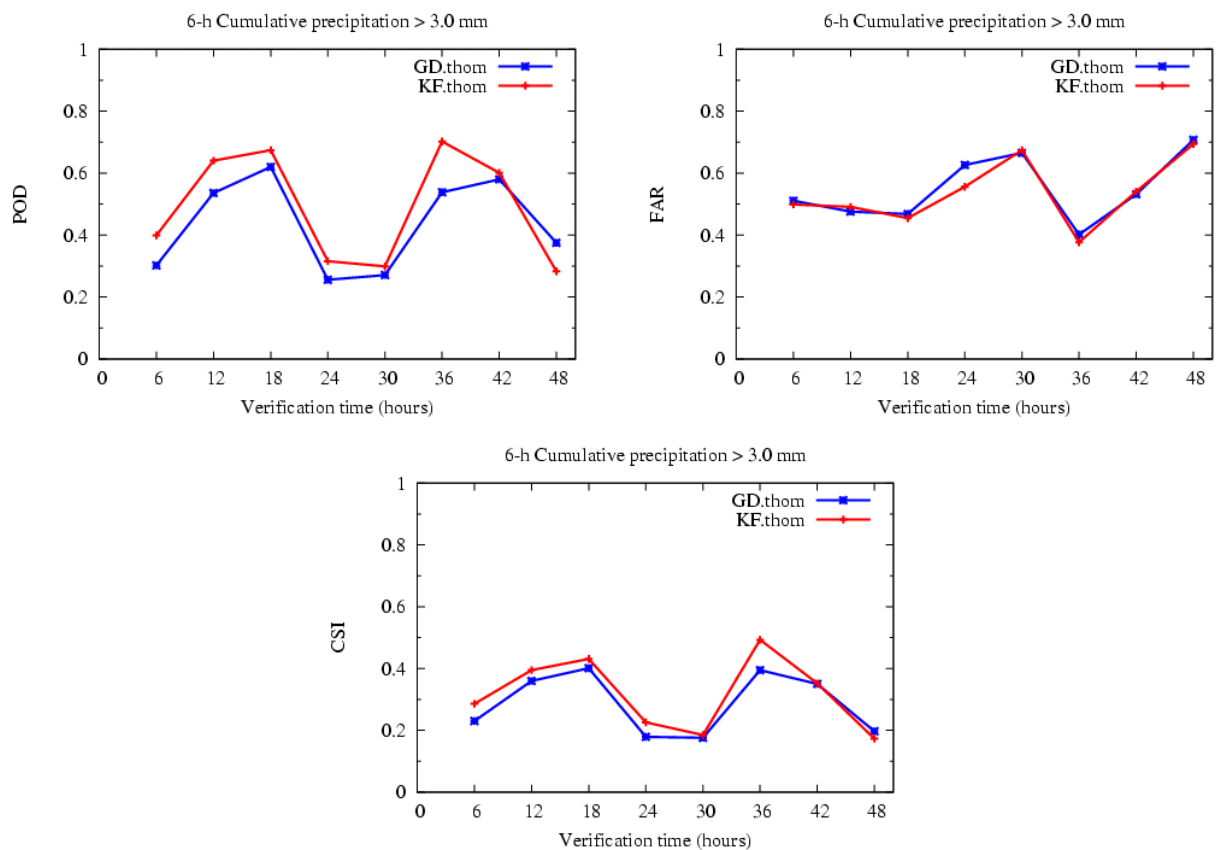


Figura 7. Evolución temporal de los índices (a) (izquierda) POD, (b) (derecha) FAR y (c) CSI, calculados desde la aproximación clásica (punto a punto) sobre todas las simulaciones inicializadas a las 00 Z para las configuraciones seleccionadas, correspondientes a intensidades superiores a 3 mm 6h⁻¹.

guras que incluyen los esquemas convectivos de GD y KF tienen un comportamiento más regular que el resto (no se muestra).

Para el viento, el MVWE en los niveles bajos y altos es más elevado que en los niveles medios, y las configuraciones que utilizan las parametrizaciones de KF y BMJ tienen mayor acierto. Por su lado, la verificación de la humedad relativa muestra que el error medio (Figuras 4a - 6a) es bajo (-10, 15%) en las tres localizaciones y para todos los niveles. De todos modos, en Barcelona y Palma el modelo es más húmedo en los niveles bajos y muy húmedo en los más altos, mientras que en Zaragoza todo el perfil vertical es demasiado húmedo. En cuanto al RMSE, (Figuras 4b - 6b) su valor incrementa con la altura en los niveles más bajos, mientras que tiende a disminuir entre los 500 y 300 hPa en Barcelona y Palma.

Finalmente, podemos concluir que casi todas las configuraciones dan resultados similares en su verificación.

5.2.2 Verificación del pronóstico cuantitativo de la precipitación

Debido a la gran cantidad de datos para analizar, esta verificación se ha hecho en dos pasos. En una primera fase, se

han analizado los índices estadísticos tradicionales para los intervalos horarios de acumulación más significativos (3 y 6 horas) con el objetivo de seleccionar, de entre las 6 combinaciones disponibles, un subconjunto con las configuraciones que proporcionan los resultados más satisfactorios.

En la segunda fase, las configuraciones seleccionadas se han evaluado con más profundidad: por un lado, se han aplicado las dos técnicas de verificación parcial o *fuzzy* descritas en el apartado 4.2, además de las clásicas, para varios umbrales de acumulaciones a lo largo de 1, 3 y 6 horas y, por otro lado, se ha realizado una comparación visual de los campos pronosticados y observados. De este modo, se ha decidido qué configuración proporciona los pronósticos óptimos.

En la primera selección, se han descartado las configuraciones que utilizan el esquema convectivo de BMJ, ya que muestran poco acierto a la hora de pronosticar intensidades elevadas, tal como puede apreciarse en la Tabla 6. A pesar de todo, cabe destacar que estas configuraciones funcionan bien cuando se producen precipitaciones de poca intensidad. De hecho, este comportamiento también ha sido detectado en otros trabajos de verificación de los pronósticos de precipitación del WRF. Por ejemplo, Gallus y Bresch (2006) detectaron que la parametrización de BMJ suele dar un BIAS ele-

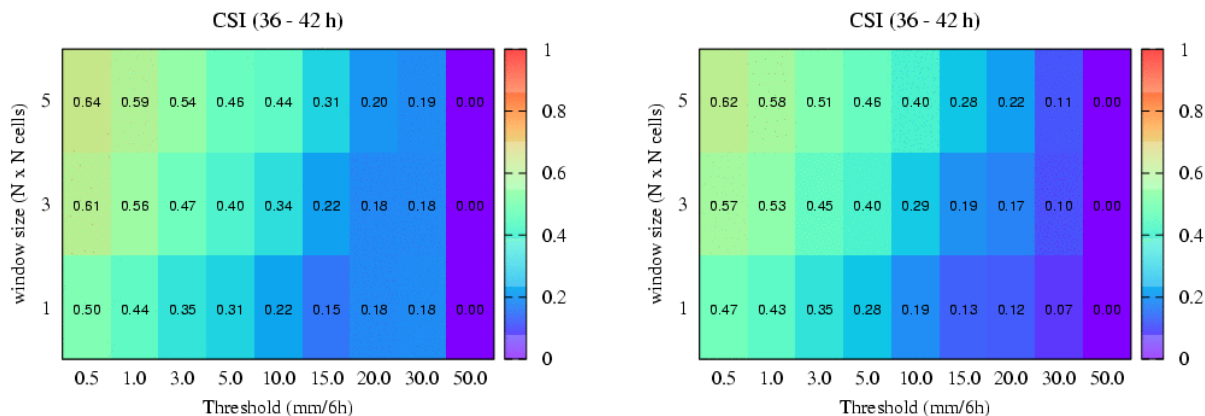


Figura 8. Índice CSI, calculado a partir del método de mínima cobertura, sobre todas las simulaciones inicializadas a las 00 Z en función del umbral de intensidad y de la ventana de vecindad, para el período de 36-42 Z de horizonte de pronóstico, correspondiente a la tarde del segundo día de pronóstico, para la configuración de KF·Thom (a) (izquierda) y para la de GD·Thom (b) (derecha).

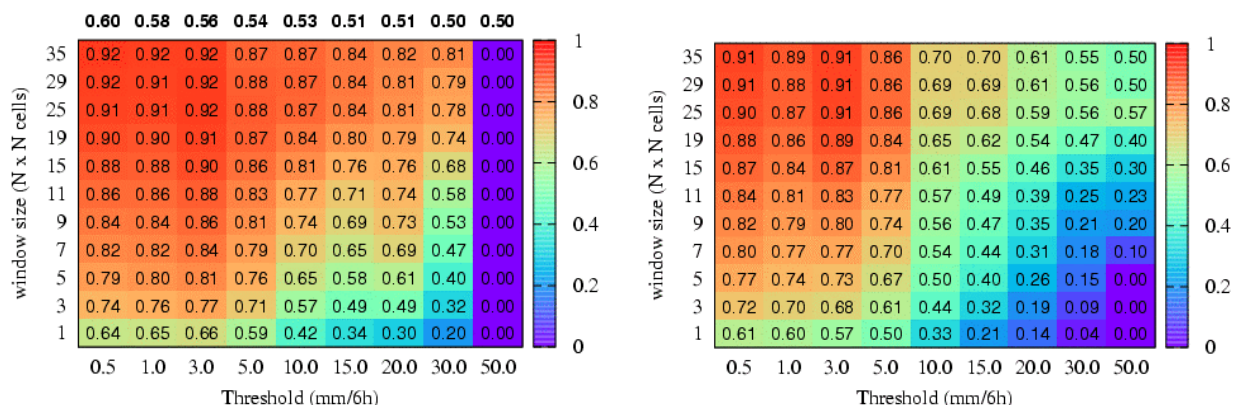


Figura 9. Índice FSS sobre todas las simulaciones inicializadas a las 00 Z en función del umbral de intensidad y de la ventana de vecindad, para el período de 30-36 Z de horizonte de pronóstico, correspondiente a la mañana del segundo día de pronóstico, para la configuración de KF·Thom (a) (izquierda) y para la de GD·Thom (b) (derecha). Los valores en negrita situados encima del gráfico (a) corresponden a $FSS_{uniform}$.

vado para umbrales de intensidad bajos y un BIAS pequeño para los umbrales más elevados, y según Jankov et al. (2007), el esquema de BMJ tiene tendencia, por un lado, a generar extensas áreas de precipitación débil, dando lugar a estos valores de BIAS altos que pueden asociarse a puntuaciones elevadas de algunos índices de acierto y, por otro lado, también suele subestimar las acumulaciones de precipitación más elevadas.

De entre las otras cuatro combinaciones (con las parametrizaciones convectivas de KF y GD), resulta difícil discernir cuál funciona mejor, pero sólo se seleccionan aquellas que se combinan con la microfísica de Thompson porque sus resultados en la verificación de la precipitación, a pesar de ser parecidos, son ligeramente mejores que los proporcionados por las combinaciones con WSM5. En este punto, la elección de las dos configuraciones que se analizan con más profundidad ya implica una discrepancia entre

las parametrizaciones de la microfísica escogidas para el dominio externo y el interno, que no se puede interpretar como una demostración que distintas configuraciones den resultados mejores en función del dominio en el que se apliquen, ya que para poder hacer esta afirmación sería necesario aplicar estrategias de verificación paralelas en ambos dominios y considerar también el campo de precipitación a 36 km. En este sentido, el principal objetivo para el dominio interno era tener unos pronósticos óptimos de precipitación, mientras que en el dominio externo, que proporciona las condiciones de contorno al interno, el máximo interés era que las variables convencionales fueran correctamente pronosticadas.

Después de la primera selección, las configuraciones KF·Thom y GD·Thom pueden analizarse con más detalle. Si se observa la evolución temporal de los índices CSI y POD, calculados bajo la aproximación clásica, se detectan dos valores máximos sobre las 18 y 36 horas de horizon-

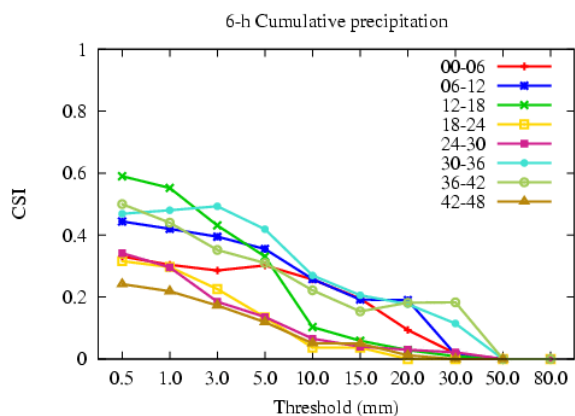


Figura 10. Para la configuración de KF + Thompson, índice CSI, calculado desde la aproximación clásica, sobre todas las simulaciones inicializadas a las 00 Z, para cada intervalo de pronóstico de 6 horas de duración, en función del umbral de acumulación.

te de pronóstico (ver Figura 7) en las simulaciones que se inicializan a las 00 Z, de modo que corresponden a los intervalos comprendidos entre las 12 Z y 18 Z del primer día y entre las 06 Z y 12 Z del segundo día, ambos a lo largo de horas diurnas, durante las cuales la actividad convectiva es más importante. Estos dos intervalos de máximo acierto, separados entre ellos en el tiempo, sugieren una influencia de los sistemas atmosféricos de más gran escala, mediante el pronóstico utilizado para alimentar las condiciones de contorno, sobre la actividad convectiva simulada por el modelo entre las 30 y 36 horas de horizonte de pronóstico.

Por otro lado, la comparación de estas dos configuraciones muestra que KF-Thom tiene mejor acierto que GD-Thom para casi todos los horizontes de pronóstico (Figura 7) ya que el índice POD más elevado corresponde a un índice FAR idéntico o inferior, circunstancia que da lugar a un CSI más alto. De todos modos, ambas configuraciones muestran que en los períodos en los que los índices POD y CSI aumentan, el índice FAR disminuye, hecho que manifiesta el buen funcionamiento, en general, de los pronósticos de la precipitación.

Si estos índices se calculan desde la aproximación de verificación parcial con el modelo de acuerdo de mínima cobertura, se observa claramente cómo el comportamiento relativo entre las dos configuraciones se mantiene para la mayoría de umbrales aunque se relaje la coincidencia espacial entre pronósticos y observaciones ampliando la ventana de verificación a cuadrados de 3 y 5 celdas de lado. En la Figura 8, para poner un ejemplo, se muestra el índice CSI correspondiente a los pronósticos de precipitación acumulada en 6 horas para el período entre 36 y 42 horas de horizonte de pronóstico y se observa, como es de esperar, que su valor aumenta a medida que se relaja el criterio de correspondencia. A pesar de esto, los valores de la configuración KF-Thom siguen siendo superiores en la mayoría de escalas y umbrales.

La evaluación contrastada de los pronósticos de precipitación dados por las dos configuraciones puede completarse analizando los valores dados por el índice FSS, que también forma parte de las técnicas de verificación parcial o *fuzzy* definidas anteriormente. Este estadístico permite determinar la escala a partir de la cual un pronóstico tiene un acierto aceptable, hecho que se cumple cuando FSS supera el valor de $FSS_{uniform}$ (Ecuación 4). A partir de los valores de este índice, se detecta cómo la configuración de KF-Thom tiende a superar el $FSS_{uniform}$ para escalas más pequeñas que GD-Thom y, en la mayoría de los casos, para las mismas escalas da valores de FSS más elevados. En las escalas más grandes, los valores de FSS de KF-Thom se acercan más a la unidad, hecho que indica un sesgo de magnitud más pequeña. En la Figura 9, se muestra un ejemplo de los valores del índice FSS de las dos configuraciones para el intervalo de 6 horas correspondiente a la mañana del segundo día de pronóstico, y se pueden observar las características que se acaban de comentar en cuanto al comportamiento relativo de los dos modelos, con la excepción del umbral de intensidad más elevada ($50 \text{ mm } 6\text{h}^{-1}$), para el cual GD-Thom hace un pronóstico claramente mejor.

En cuanto a la verificación visual del campo de precipitación (no se muestra), se ha detectado una cierta homogeneidad entre las dos configuraciones en el pronóstico de precipitaciones en el cuadrante NW de Cataluña (que incluye uno de los máximos pluviométricos del territorio), y también en el conjunto del dominio en los casos en los que la precipitación explícita representa una parte importante de la precipitación total pronosticada; estas últimas situaciones mayoritariamente se asocian al paso de sistemas frontales sobre el área de estudio. En cambio, cuando la precipitación simulada es mayoritariamente de origen convectivo, las configuraciones difieren substancialmente en zonas del cuadrante NE y en el litoral y prelitoral central, con discrepancias en los patrones de precipitación que se acentúan a medida que el horizonte de pronóstico se alarga.

En definitiva, se puede concluir que las dos configuraciones seleccionadas presentan un acierto satisfactorio, pero los tres métodos de verificación utilizados para comparar los reiteran que es la combinación de la parametrización convectiva de Kain-Fritsch con el esquema microfísico de Thompson la que muestra el comportamiento más consistente y los pronósticos más precisos.

Llegados a este punto, resulta interesante caracterizar el comportamiento particular de esta configuración representando el índice CSI, calculado desde la aproximación clásica, en función del umbral de intensidad para cada intervalo 6-horario, tal como se muestra en la Figura 10. Se observa cómo, para precipitaciones débiles, la mejor previsión la consigue entre las 12 Z y 18 Z del primer día, para lluvias moderadas (3 a 15 mm en 6 horas) entre las 06 Z y 12 Z del segundo día, y el mejor pronóstico para las lluvias más intensas ($30 \text{ mm } 6\text{h}^{-1}$) lo da entre las 12 Z y 18 Z del segundo día.

6 Conclusiones

En el presente trabajo, se ha evaluado la sensibilidad del modelo WRF-ARW 2.2 a las combinaciones de las distintas parametrizaciones convectivas disponibles en el modelo con los esquemas microfísicos WSM5 y Thompson, para 11 casos de estudio repartidos entre distintas épocas del año. El principal propósito ha sido el de buscar una configuración estable del modelo para los pronósticos operativos en el SMC.

Tanto para el dominio externo (36 km de paso de malla) como para el interno (12 km), se han verificado las variables convencionales mediante el cálculo de los índices ME y RMSE, y el MVWE para el viento. Los mejores resultados para el dominio externo se han obtenido con la configuración que combina la parametrización de la convección de Kain-Fritsch con el esquema microfísico WSM5. Para el dominio interno no se ha encontrado ninguna configuración que destacara en el pronóstico de las mismas variables verificadas en el dominio externo, pero después de evaluar el pronóstico cuantitativo de la precipitación con los índices estadísticos clásicos (POD, CSI, FAR y BIAS), se han escogido las dos configuraciones con mejores resultados (las que combinan Kain-Fritsch y Grell-Devenyi con Thompson) y se ha realizado una verificación más exhaustiva, en la que se han utilizado dos técnicas de verificación parcial o *fuzzy* (mínima cobertura y *Fractions Skill Score*) para complementar la metodología clásica. El análisis de estos resultados ha mostrado que la configuración con el mejor acierto es la que combina Kain-Fritsch con la microfísica de Thompson.

A pesar de todo, hay que reconocer que la significatividad de estos resultados tiene ciertas limitaciones. Por un lado, los casos de estudio corresponden a un período de tiempo concreto (años 2006 y 2007) y la variabilidad meteorológica interanual, sobre todo por lo que respecta a precipitaciones, es extraordinariamente elevada en el territorio estudiado. Por otro lado, se ha dejado fuera del objetivo de este trabajo analizar la sensibilidad de los pronósticos a las parametrizaciones de la capa límite disponibles en el modelo, aunque juegan un papel clave en la simulación de los procesos convectivos.

La aplicación práctica más inmediata de este trabajo es la implementación de las dos configuraciones escogidas (KF-WSM5 para el dominio externo y KF-Thom para el anidado) en los pronósticos operativos del WRF en el SMC. Esto permitirá, posteriormente, verificar los pronósticos del WRF contra los otros modelos que actualmente funcionan operativamente en el SMC.

Además, se establece un punto de partida para continuar trabajando con el modelo WRF-ARW con el objetivo de mejorar los pronósticos operativos realizados por el SMC. Por un lado, al tratarse de un modelo en constante evolución, habrá que verificar los pronósticos producidos por las versiones actualizadas del modelo, y realizar más estudios de sensibilidad si se incorporan nuevas parametrizaciones, que tendrán que incluir los procesos de PBL que han quedado fuera de este trabajo. Por otro lado, dado que es

la parametrización convectiva presente en el WRF la que ha dado mejor resultado sobre el área de interés, también se abre una vía para investigar con profundidad el esquema de Kain-Fritsch, realizando estudios de sensibilidad de los pronósticos a distintos parámetros internos del esquema con el objetivo de introducir en él modificaciones que resulten en una mejora de los pronósticos de lluvia convectiva sobre Cataluña.

Agradecimientos. Queremos agradecer la ayuda y los consejos de nuestros compañeros del *Àrea de Recerca Aplicada i Modelització del Servei Meteorològic de Catalunya* (Área de Investigación Aplicada y Modelización del Servicio Meteorológico de Cataluña), y también de la cuidadosa lectura del trabajo y las observaciones aportadas por los dos revisores anónimos que han ayudado a mejorar la calidad del artículo.

Referencias

- Barker, D. M., Huang, W., Guo, Y. R., y Xiao, Q. N., 2004: *A Three-Dimensional (3DVAR) Data Assimilation System For Use With MM5: Implementation and Initial Results*, Mon Wea Rev, **132**, 897–914, doi: 10.1175/1520-0493(2004)132<0897:ATVDAS>2.0.CO;2.
- Borge, R., Alexandrov, V., del Vas, J. J., Lumbreras, J., y Rodríguez, E., 2008: *A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula*, Atmos Environ, **42**, 8560–8574, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.08.032.
- Davis, C. A., Brown, B., y Bullock, R., 2006: *Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: Application to convective rain systems*, Mon Wea Rev, **134**, 1785–1795, doi: 10.1175/MWR3146.1.
- Ebert, E. E., 2008: *Fuzzy verification of high-resolution gridded forecasts: a review and proposed framework*, Meteorol Appl, **15**, 51–64, doi: 10.1002/met.25.
- Gallus, W. A. y Bresch, J. F., 2006: *Comparison of Impacts of WRF Dynamic Core, Physics Package, and Initial Conditions on Warm Season Rainfall Forecasts*, Mon Wea Rev, **134**, 2632–2641, doi: 10.1175/MWR3198.1.
- Hong, S.-Y. y Pan, H. L., 1996: *Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model*, Mon Wea Rev, **124**, 2322–2339, doi: 10.1175/1520-0493(1996)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2.
- Hong, S.-Y., Dudhia, J., y Chen, S.-H., 2004: *A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation*, Mon Wea Rev, **132**, 103–120, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2.
- Hong, S.-Y., Noh, Y., y Dudhia, J., 2006: *A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes*, Mon Wea Rev, **134**, 2318–2341, doi:10.1175/MWR3199.1.
- Jankov, I., Gallus, W. A., Segal, M., y Koch, S. E., 2007: *Influence of Initial Conditions on the WRF-ARW Model QPF Response to Physical Parameterization Changes*, Wea Forecasting, **22**, 501–519, doi: 10.1175/WAF998.1.
- Jorba, O., Jiménez-Guerrero, P., y Baldasano, J. M., 2008: *Annual evaluation of WRF-ARW and WRF-NMM meteorological simulations over Europe*, Papers del 9th WRF Users' Workshop, Boulder, CO, USA, 23-27/VI/2008, <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2008/abstracts/8-03.pdf>.

- Kain, J., Weiss, S., Baldwin, M., Carbin, G., Bright, D., Levit, J., y Hart, J., 2005: Evaluating high-resolution configurations of the WRF model that are used to forecast severe convective weather: The 2005 SPC/NSSL spring experiment, Preprints, 21st Conf. on Weather Analysis and Forecasting, Washington, D.C., Amer. Meteor. Soc., 2A.5, <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/94843.pdf>.
- Kain, J. S., Weiss, S. J., Levit, J. J., Baldwin, M. E., y Bright, D. R., 2006: *Examination of convection-allowing configurations of the WRF model for the prediction of severe convective weather: The SPC/NSSL Spring Program 2004*, Wea Forecasting, **21**, 167–181, doi: 10.1175/WAF906.1.
- Klemp, J. B., 2006: *Advances in the WRF model for convection-resolving forecasting*, Advances in Geosciences, **7**, 25–29.
- Koo, M. S. y Hong, S. Y., 2008: Diurnal cycle of the simulated precipitation in WRF: physics sensitivity, Papers del 9th WRF Users' Workshop, Boulder, CO, USA, 23-27/VI/2008, <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2008/abstracts/P9-13.pdf>.
- Llasat, M. C., 2001: *An objective classification of rainfall events on the basis of their convective features: application to rainfall intensity in the northeast of Spain*, Int J Climatol, **21**, 1385–1400, doi: 10.1002/joc.692.
- Llasat, M. C. y Puigcerver, M., 1997: *Total rainfall and convective rainfall in Catalonia, Spain*, Int J Climatol, **17**, 1683–1695, doi:10.1002/(SICI)1097-0088(199712)17:15<1683::AID-JOC220>3.0.CO;2-Q.
- Mateo, J., Ballart, D., Brucet, C., Aran, M., y Bech, J., 2009: *A study of a heavy rainfall event and a tornado outbreak during the passage of a squall line over Catalonia*, Atmos Res, **93**, 131–146, doi:10.1016/j.atmosres.2008.09.030.
- Mercader, J., Codina, B., Sairouni, A., y Cunillera, J., 2007: Sensitivity of precipitation forecasts to cumulus parameterizations in Catalonia (NE Spain), Papers del 8th WRF Users' Workshop, Boulder, CO, USA, 11-15/VI/2007, http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2007/abstracts/p1-26_Mercader.pdf.
- Otkin, J., Huang, H. L., y Seifert, A., 2006: A comparison of microphysical schemes in the WRF model during a severe weather event, Papers del 7th WRF Users' Workshop, Boulder, CO, USA, 19-22/VI/2006, http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2006/abstracts/PSession05/P5_7_Otkin.pdf.
- Roberts, N. M. y Lean, H. W., 2008: *Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events*, Mon Wea Rev, **136**, 78–97, doi: 10.1175/2007MWR2123.1.
- Sairouni, A., Moré, J., Toda, J., Miró, J. R., Aran, M., y Cunillera, J., 2007: Verificació dels models de mesoescala operatius al Servei Meteorològic de Catalunya, Notes d'estudi del Servei Meteorològic de Catalunya, n. 71, 78 pp. (ISBN 978-84-393-7590-6).
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., y Powers, J. G., 2005: A description of the Advanced Research WRF Version 2, NCAR Tech Notes-468+STR, (rev. 2007).
- Thompson, G., Rasmussen, R. M., y Manning, K., 2004: *Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis*, Mon Wea Rev, **132**, 519–542, doi: 10.1175/1520-0493(2004)132<0519:EFOWPU>2.0.CO;2.
- Wang, W., Barker, D., Bray, J., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., y Michalakes, J., 2007: User's Guide for Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 2.2, Mesoscale and Microscale Meteorology Division - National Center for Atmospheric Research (MMM-NCAR).
- Weisman, M. L., Davis, C., Wang, W., Manning, K. W., y Klemp, J. B., 2008: *Experiences with 0-36-h Explicit Convective Forecasts with the WRF-ARW Model*, Wea Forecasting, **23**, 407–437, doi: 10.1175/2007WAF2007005.1.
- Wilks, D. S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction*, Academic Press, 467 pp.
- Wisse, J. S. P. y Vilà-Guerau de Arellano, J., 2004: *Analysis of the role of the planetary boundary layer schemes during a severe convective storm*, Ann Geophys, **22**, 1861–1874, doi:10.5194/angeo-22-1861-2004.